ESTUDO E MELHORIA DO PROCESSO DE LIQUEFAÇÃO DOS GASES

STUDY AND IMPROVEMENT OF THE GAS LIQUEFACTION PROCESS

Isabella Vieira Moraes[1], Rodrigo Reis de Souza[2], Marcos Tadeu Tavares Pacheco[2]

[1]Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Santa Cecília
[2]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Santa Cecília
e-mail para contato: ivmoraes013@gmail.com

RESUMO – Com a evolução dos processos fabris, as empresas buscam sistemas mais eficientes que garantam um controle rigoroso, tanto na segurança do produto quanto dos colaboradores. Esse controle abrange desde a chegada dos insumos até a conclusão da produção. Para indústrias que demandam alta precisão, a adoção de tecnologias avançadas torna-se imprescindível. Nesse contexto, os sistemas monitorados pelo Modelo de Controle Preditivo (MPC) permitem um acompanhamento detalhado e preciso de cada etapa da produção. Este artigo analisa os benefícios econômicos obtidos por uma empresa do Polo Industrial de Manaus ao implementar o MPC em uma planta de separação de gases do ar, destacando a redução no consumo de energia elétrica e a otimização do processo. Os resultados demonstram a eficácia do sistema, não apenas na diminuição do consumo de energia, mas também no aprimoramento do controle da produção e na garantia da segurança das máquinas. A adoção do MPC gerou resultados satisfatórios, com retorno do investimento visível em curto prazo, o que resultou em uma maior reserva de capital, possibilitando novos investimentos em melhorias.

Palavras-chave: MPC–Modelo de Controle Preditivo, CLP – Controlador Lógico Programável, Liquefação, Gases, Energia Elétrica.

ABSTRACT – With the evolution of manufacturing processes, companies are seeking more efficient systems that ensure strict control over both product quality and employee safety. This control spans from the arrival of raw materials to the completion of production. For industries requiring high precision, the adoption of advanced technologies becomes essential. In this context, systems monitored by Model Predictive Control (MPC) allow for detailed and accurate tracking of each production stage. This article analyzes the economic benefits achieved by a company in the Manaus Industrial Hub through the implementation of MPC in an air separation plant, highlighting the reduction in electricity consumption and process optimization. The results demonstrate the system's effectiveness, not only in reducing energy consumption but also in improving production control and ensuring machine safety. The adoption of MPC yielded satisfactory results, with a noticeable return on investment in the short term, leading to a greater capital reserve that enabled further investment in improvements.

Keywords: MPC - Model Predictive Control, PLC - Programmable Logic Controller, Liquefaction, Gas, Electricity.

1 INTRODUÇÃO

Decorrente de uma série de fatores que modificam os processos fabris, entre os quais podemos citar a concorrência por espaço no mercado e as constantes alterações nas legislações tanto trabalhistas quanto as que passam pela sociedade no que tange a conservação do meio ecológico local, as empresas tendem a convergir para sistemas cada vez mais enxutos que proporcionem um alto nível de controle, tanto em segurança do produto como dos colaboradores envolvidos, fazendo com que o produto tenha um acompanhamento desde a chegada dos insumos até a finalização do processo. Contudo, empresas que necessitam de maior controle de seus processos fabris se faz necessário um avanço na tecnologia utilizada, neste caso entram em cena os sistemas monitorados por MPC (Modelo de Controle Preditivo) no qual haverá um percentual de mais abrangência de cada etapa de produção de forma muito mais direta e sem grandes perdas. Uma empresa do Polo Industrial de Manaus produz Gases Liquefeitos, onde seu maior insumo do Processo é a Energia Elétrica, consumindo uma média mensal de 2.022.959 kWh. Sendo assim exigiu-se um estudo para minimizar o consumo diário/mensal de energia e constatamos que através da utilização do Programa MPC – Modelo de Controle Preditivo, onde foram feitos testes na Planta de Separação de Ar, chegando a valores menores e trazendo uma economia significativa para a empresa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Reduzir o Consumo de Energia Elétrica, através da utilização do Programa MPC em Plantas de Separação dos Gases do Ar.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar que um modelo de MPC (Modelo de Controle Preditivo) é vantajoso para a organização em relação ao consumo de energia elétrica;
- Demonstrar que o uso de um sistema preditivo alavanca o potencial da Organização com relação à qualidade do produto;
- Manter um alto nível de eficiência e estabilidade, durante o tempo de operação;
- Reduzir o tempo de monitoramento do sistema pelo operador.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS: Em processos fabris, otimizar significa agregar maior valor ao produto que se trabalha gerando melhor desempenho sem custos desnecessários e com maior produtividade. Para alcançar tais objetivos à otimização se

beneficia de métodos e componentes tais quais a estatística, a matemática (modelagem matemática) e de um sistema informatizado a altura dos resultados almejados (AIR LIQUIDE, 2013). Um sentido correto a ser seguido em otimização vem ser primeiramente o de agrupar dados brutos (controles, tabelas, estoques...) de modo que estes sirvam de informações gerenciais a serem aplicadas para uma posterior tomada de decisão, a partir deste estado pode-se criar sistemas computacionais, que somados as novas tecnologias em automação, realizarão um desempenho a custos reduzidos e com resultados mais satisfatórios.

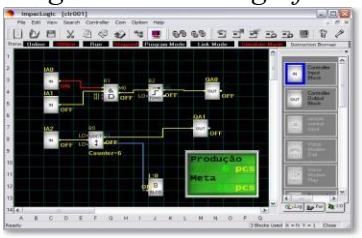
3.2 CLP (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL): Com o emprego dos computadores no meio industrial foi gerada uma vantagem em vista do auxilio do processo produtivo justificado pelo aumento da produção e redução de gastos por estes serem os responsáveis pela automação dos equipamentos, realizando comandos para máquinas de grande porte, sinalizar defeitos e até mesmo criar relatórios de operação. O conceito do CLP (Programmable Logic Controller) vem da comunicação entre informações do tipo analógica (sensores, chaves, indicadores de temperatura, indicadores de pressão) que são coletados no meio físico depois transferidos por impulsos elétricos até o CLP onde esses sinais passam a ser digitais sendo interpretados pelo software de controle.

Figura 1 - Módulo CLP.



Fonte: Revista Sodebras, 2011

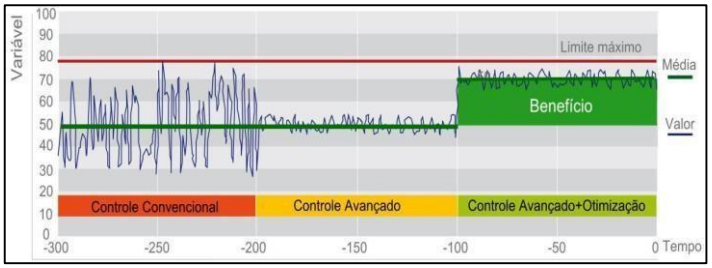
Figura 2 – Visual gráfico CLP.



Fonte: Revista Sodebras, 2011

3.3 MPC (MODELO DE CONTROLE PREDITIVO): O MPC vem ser um sistema que trabalha com controle preditivo com aplicação em processos industriais com dinâmicas difíceis, com origem em um modelo já existente fazendo com que este atue de forma a prever diversas situações com base em cálculos matemáticos antecipando assim seus sistemas de controle e assumindo valores que se aproximem de setpoints otimizados de processo. O sistema em si consiste na base de entradas originadas pelo processo e posterior resposta em um determinado intervalo de tempo, demandando um armazenamento de grande quantidade de valores reproduzindo a dinâmica do processo de produção, prevendo as melhores respostas com referência em uma trajetória que se almeja como a ideal. Deste modo, o operador passa apenas a determinar valores de setpoints para cada evento do processo. (PRAXAIR INC, 2013).

Figura 3 – Evolução de variável importante no tempo.



Fonte: Augusto de Andrade, P. 2009.

3.4 PLATAS DE SEPARAÇAO DOS GASES DO AR: As plantas de separação dos gases do ar são instalações industriais projetadas para extrair e purificar os componentes do ar atmosférico, como oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e argônio (Ar). O processo mais comum utilizado é a destilação criogênica, que resfria o ar até que seus componentes se liquefaçam e possam ser separados com base em seus diferentes pontos de ebulição. Esses gases desempenham um papel fundamental na indústria e são amplamente utilizados em setores como metalurgia, petroquímica, medicina (oxigênio hospitalar), produção de eletrônicos e na conservação de alimentos.

4 MATERIAIS E MÉTODO

Os métodos de pesquisa que podem dar suporte na composição do estudo mencionado são os que seguem abaixo:

a) Método Comparativo, procede pela investigação de indivíduos, classes, fenômenos ou fatos, com vistas a ressaltar as diferenças e similaridades entre eles (GIL, 2019).

b) Método estatístico, fundamenta-se na aplicação da teoria estatística da probabilidade e constitui importante auxílio para a investigação em ciências sociais. (GIL, 2019).

Com base em Gil (2019) às técnicas de pesquisa aplicáveis ao contexto do estudo, apontam-se as seguintes:

a) Técnica da Pesquisa Bibliográfica, que é elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos periódicos e atualmente com material disponibilizado na internet.

b) Técnica da Pesquisa Participante, pesquisa desenvolvida a partir da interação entre os pesquisadores e membros da situação investigada

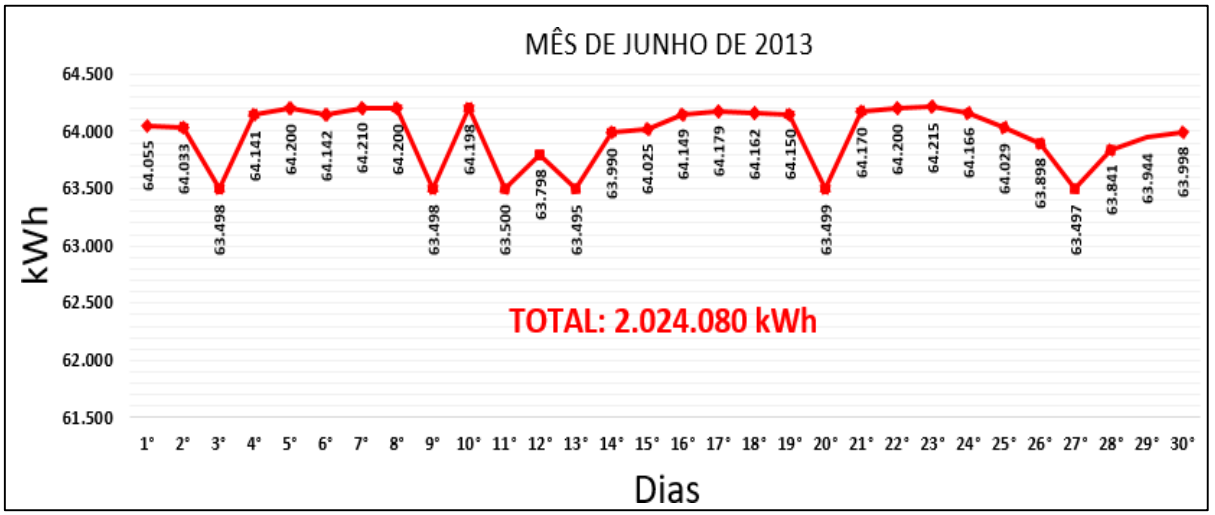
Implementação da Melhoria no Processo

Nosso estudo iniciou em Janeiro de 2013. Durante alguns dias, discutimos junto com o setor de planejamento da fábrica, todo o processo de separação dos gases do ar, suas características e suas particularidades. O objetivo era obter dados e conhecimento para propor uma estratégia

de controle que fosse adequada à otimização do processo para que pudéssemos ter uma redução do consumo de energia elétrica, como mostra os gráficos na Figuras 4 e 5 os consumos diários e mensais de Energia, junto com o setor de Engenharia.

Através de relatórios diários de consumo de Energia Elétrica, fornecidos pela própria Concessionária, fizemos o levantamento dos dados de consumo de energia elétrica da empresa analisada.

Gráfico 1 – Consumo Diário de Energia, Mês de Junho



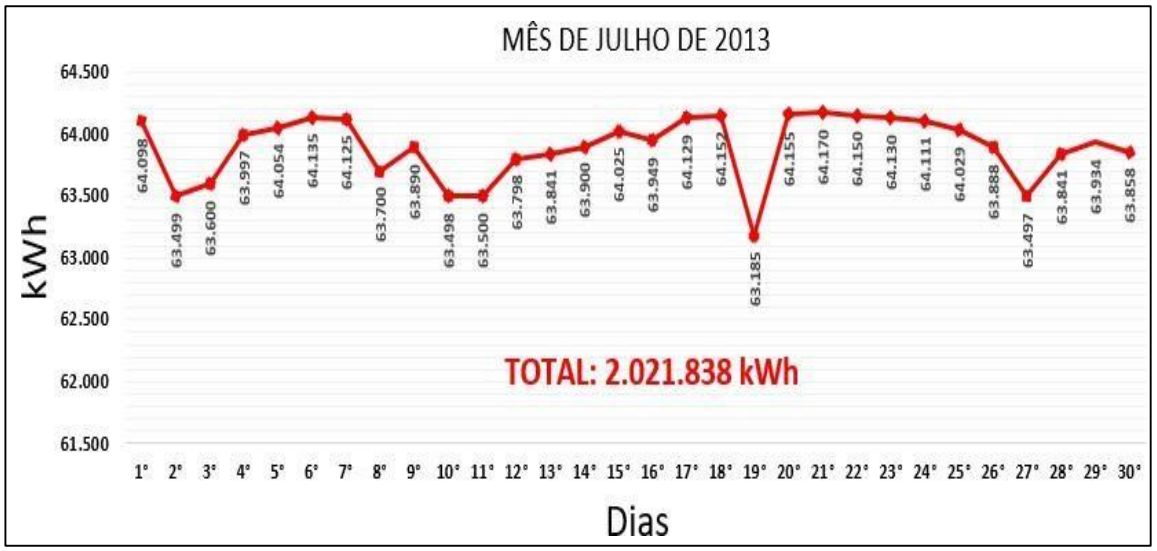
Fonte: CCK - Automação, 2013.

A imagem apresenta um gráfico de barras ilustrando o consumo diário que a empresa tem, em energia elétrica durante o mês de Junho de 2013. No eixo vertical (y), os valores de consumo são expressos em kWh, variando de 0 a 80.000 kWh, enquanto o eixo horizontal (x) representa os dias do mês, de 1 a 30 dias.

Cada barra azul indica o consumo diário, com valores que oscilam entre aproximadamente **65.989 e 67.720 kWh**, e o destaque na cor vermelha, está o consumo total do mês, que alcança **2.024.080,0 kWh**.

Já no mês subsequente, o consumo de energia apresentou uma pequena variação no consumo diários de energia elétrica ao longo do mês de julho de 2013

Gráfico 2 – Consumo Diário de Energia, Mês de Julho.



Fonte: CCK - Automação, 2013.

A análise do gráfico indica uma demanda estável, com valores diários próximos a 67.500 kWh. O total acumulado no período foi de **2.021.838,0 kWh**. A estrutura visual destaca o consumo constante, representado por barras azuis com pequenas variações no decorre dos dias. De modo geral, os gráficos revelam um consumo diário relativamente estável, com pequenas flutuações ao longo do período.

O consumo total de energia no mês de Junho é foi de **2.024.080,0 kWh** e no mês de Julho de **2.021.838,0 kWh**, tendo uma média mensal de aproximadamente **2.022.959,0 kWh** de energia consumida pela empresa.

Diante desses valores obtidos, a melhor proposta foi de implementar o sistema MPC, sistema no qual foi desenvolvido por engenheiros da Shell para controle de refinarias.

Divisão do Processo de Liquefação dos Gases do Ar

Figura 4 - Divisão de Processo de Liquefação dos Gases do Ar.



Fonte: Manual de Operação Praxair, 2010.

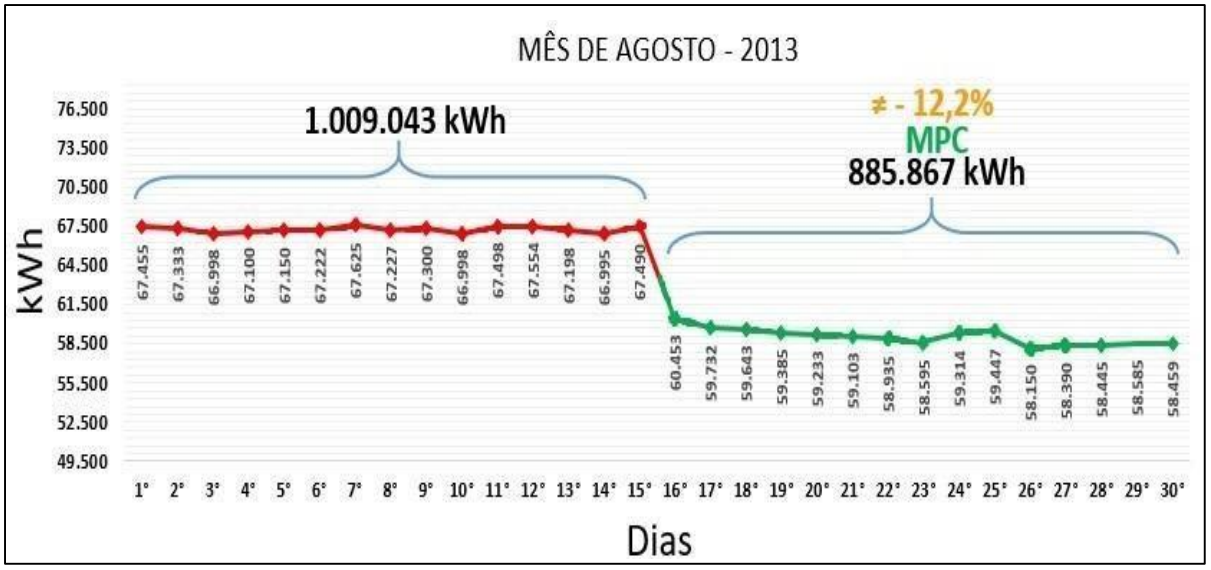
A aplicação de um sistema preditivo neste processo está diretamente vinculado aos sub-processos de compressão, purificação e liquefação onde atuará de forma a controlar as potências de trabalho dos equipamentos de compressão (compressores e turbinas), ar de processo (vazão de ar, vazão de shelf, vazão de ketlle e adição de refrigeração para a coluna superior), através das controladoras de vazão (Guide Vanes) comandadas por válvulas pneumáticas realizando interações entre estes através de gráficos e históricos de produção prevendo uma possível

perturbação no processo que poderia ocasionar perdas de purezas ou danos aos maquinários mais pesados.

Para o desenvolvimento e implementação desse sistema na empresa em questão, foi composta uma equipe multidisciplinar na qual nós fizemos parte. Esta equipe foi formada por profissionais com conhecimentos do processo, da operação e controle, instrumentação e sistemas. A participação dos profissionais ligados diretamente ao processo é de grande importância para o sucesso do projeto. Estes se tornam o elo com os operadores que irão operar diretamente o sistema.

Como existia uma previsão de parada para manutenção envolvendo modificações na unidade no início da primeira semana de Julho, decidimos por implementar inicialmente somente uma parte do processo. Foi escolhida para esta implementação inicial, a unidade de filtragem e compressão, onde o ar é filtrado do meio ambiente e comprimido para gerar o fluxo do processo. Onde tivemos bons resultados. Esta implementação inicial teve a vantagem de ser mais simples e de menor porte que a de todo o processo. Desta forma houve menor dificuldade de adaptação e de mudanças de cultura operacionais. Com o menor tamanho do controle o treinamento dos operadores foi bastante facilitado. O entendimento das ações e das formas de operar a nova tecnologia de controle foi também simplificado. No mês seguinte, Agosto, foi implantado o sistema em todo o processo de fabricação, pois o sistema MPC usa poucos requisitos estruturais como, um micro computador com configuração compatível para o sistema e modens de conexão. Em poucos dias de uso, já apresentou resultados satisfatórios. De acordo com os gráficos das figuras abaixo, podemos ver a economia que conseguimos ao implantarmos o programa MPC.

Gráfico 3 – Consumo Diário de Energia, Mês de Agosto



Fonte: CCK - Automação, 2013.

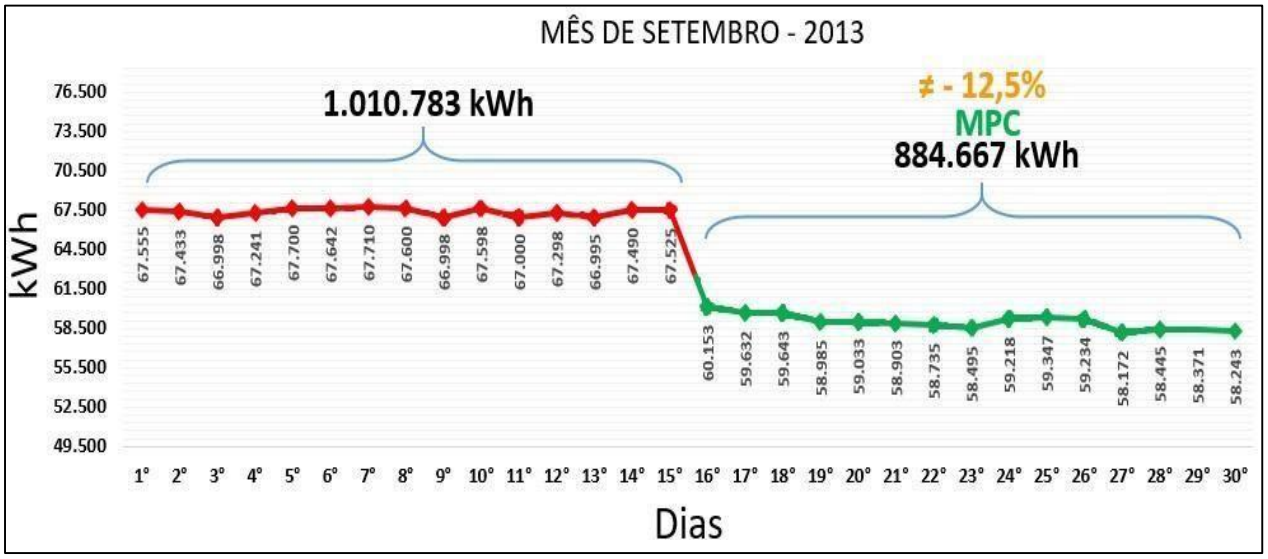
O gráfico divide o mês em duas fases distintas, sendo a primeira quinzena caracterizada por um consumo mais elevado e a segunda por uma redução significativa no uso de energia.

Os primeiros quinzena dias(1º a 15º dia),o consumo diário manteve-se em um patamar elevado e relativamente constante, com valores oscilaram entre **66.995 kWh e 67.455 kWh**. O total de energia consumida nesse período foi de **1.009.043 kWh** .

Ja na segunda quinzena (16º a 30º dia), houve uma queda significativa no consumo de energia em comparação com a primeira metade do mês.O consumo diário variou entre **59.372 kWh e 58.485 kWh**, tendo um consumo total nesse perido de **885.867 kWh,** representando uma redução de **12,2%** em relação à primeira quinzena.

O mês subsequente foi realizado o mesmo procedimento para quantificar o consumo de energia da empresa estudada.

Gráfico 4 – Consumo Diário de Energia, Mês de Setembro.



No mês de Setembro foi realizado o mesmo procedimento do mês anterior onde o consumo total de energia dos primeiros quinze dias (1º a 15º dia), foi de **1.010.783,0 kWh**. E na segunda quinzena (16º a 30º dia) o consumo total de energia foi de **884.667,0 kWh**, representando uma redução de **12,5 %** em relação aos primeiros quinze dias do mês de Setembro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do sistema Modelo de Controle Preditivo (MPC) na empresa demonstrou ser altamente eficaz, proporcionando benefícios significativos tanto na redução do consumo de energia elétrica quanto na otimização operacional dos processos produtivos.

Os dados coletados e analisados mostram que, logo nos primeiros meses de implementação, houve uma redução substancial no consumo energético da empresa. Nos meses de Agosto e Setembro, foi constatado uma economia de aproximadamente 12,2% e 12,5%, respectivamente,

ao comparar com a primeira quinzena desses períodos. Esse resultado comprova a eficiência do MPC na gestão do consumo de energia, garantindo um funcionamento mais econômico e sustentável da planta industrial.

Além da economia energética, a implementação do MPC também proporcionou outros benefícios operacionais: *Melhoria no Controle do Processo* - O sistema passou a atuar diretamente no gerenciamento das potências dos compressores, turbinas e outros equipamentos essenciais, garantindo um funcionamento mais equilibrado. Essa abordagem permitiu uma melhor estabilidade operacional, minimizando oscilações no consumo e garantindo maior previsibilidade na demanda energética; *Aumento da Eficiência e Segurança Operacional* - Com o MPC, a empresa conseguiu manter um controle mais preciso das variáveis do processo, evitando picos de consumo desnecessários e prevenindo falhas que poderiam comprometer a integridade dos maquinários. A otimização do uso das válvulas pneumáticas e controladores de vazão reduziu os riscos de sobrecarga nos equipamentos, aumentando sua vida útil e diminuindo custos com manutenções corretivas; *Retorno do Investimento e Viabilidade Econômica* - O retorno sobre o investimento foi perceptível em um curto período, visto que a economia de energia elétrica gerou uma redução direta nos custos operacionais da empresa. Esse ganho financeiro permitiu a realocação de capital para outras melhorias no processo produtivo, tornando a fábrica mais competitiva e sustentável; *Facilidade de Integração e Adaptação* - A estratégia de implementação gradual do MPC, iniciando pela unidade de filtragem e compressão, facilitou a adaptação dos operadores ao novo sistema. O treinamento simplificado e a integração eficiente entre os profissionais envolvidos foram fatores-chave para o sucesso da implementação.

Com base nesses resultados, é possível afirmar que o Modelo de Controle Preditivo (MPC) não apenas reduziu significativamente o consumo energético, mas também proporcionou maior eficiência, confiabilidade e segurança ao processo produtivo. Diante desse cenário positivo, a empresa pode considerar uma expansão do uso do MPC em outros setores da produção, explorando novas oportunidades para maximizar a eficiência e reduzir ainda mais os custos operacionais.

6 CONCLUSÃO

Com o estudo apresentado é notável que a implementação de um sistema que possa interagir com quase todos os processos vigentes em um modelo de produção traz resultados concretos e satisfatórios englobando os meios operacionais, de qualidade e econômicos fazendo com que a organização que o utiliza tenha um controle mais otimizado e dentro dos parâmetros exigidos

pelas instituições governamentais e da sociedade como um todo.

No que diz respeito ao processo de separação dos gases do ar observa-se como os diversos fatores que o influenciam podem ser monitorados de maneira a alcançar uma redução significativa das perdas de produtos e de energia elétrica deste processo, como também um nível de produção no qual o monitoramento totalmente humano não seria capaz de obter.

Podemos também atentar que se faz necessário que o corpo técnico de operação tenha um nível de entendimento mais apurado em relação ao processo e as novas tecnologias apresentadas, orientados a estes a buscarem um nível de formação mais elevado agregando assim mais valor à organização de um modo geral.

7 TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados positivos obtidos com a implementação do Modelo de Controle Preditivo (MPC) na planta de separação dos gases do ar, futuras pesquisas poderão explorar aprimoramentos adicionais no sistema, como a realização de estudos para otimização contínua das parâmetros operacionais do sistema, com o uso de inteligência artificial, aprimorando ainda mais a eficiência energética e a estabilidade do processo em questão. Além disso, investigações sobre a integração do MPC com tecnologias de automação industrial avançadas, como sistemas de monitoramento remoto e análise preditiva de falhas, métodos que poderão fornecer melhorias adicionais na produtividade e na segurança operacional da planta industrial.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressaram sua profunda gratidão à empresa do White Martins que viabilizou este estudo, fornecendo acesso aos dados operacionais e apoio técnico essencial para a implementação e análise do Modelo de Controle Preditivo. A colaboração da equipe técnica da empresa foi fundamental para o sucesso do trabalho, contribuindo com informações valiosas e suporte durante todas as etapas da pesquisa.

Agradecemos também à Universidade Santa Cecília e ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica pelo suporte acadêmico e orientação na realização deste trabalho.

8 REFERÊNCIAS

AIR LIQUIDE, *Criogenia*. Air Liquide. 2012. Disponível em <http://www.airliquide.com.br>. Acesso em 25 de Março de 2025.

AUGUSTO DE ANDRADE, P. et al. *Implementação do controle avançado e otimização no processo*. O papel. Vol. 70. n. 11. p. 66-77. 2009

AUTOMAÇÃO CCK, Consumo de Energia Elétrica. 2013. Disponível em

www.cckautomacao.com.br. Acesso em 25 de Março de 2025.

AYALA BRAVO, CLAUDIO O. *Controle de plantas não lineares utilizando controle preditivo linear baseado em modelos locais*. Revista Controle & Automação, vol. 22. p. 466-479. 2011.

DE MEDEIROS DALPIAZ, LUCAS. *Análise de fornecimento de produtos da destilação criogênica do ar*. 2010. f. TCC. (Graduação em Engenheiro Químico) – UFRGS, Rio Grande do Sul, 2010.

FACCINI SANTORO, BRUNO. Controle de horizonte infinito para sistemas integradores e com tempo morto. 2011. f. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia) – EP/USP, São Paulo, 2011.

FERREIRA DA SILVA, CLAUDIO. *Controle preditivo robusto aplicado à máquina síncrona*. Revista SODEBRAS. Vol. 6. n. 68. p. 2-6. 2011.

GANCINE ESTURILIO, GLAUCO. Modelagem e controle preditivo econômico de um reator de amônia. 2011. f. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia) – EP/USP, São Paulo, 2011.

GIL, Antônio Carlos. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. 7ª. Ed. São Paulo: Atlas, 2019.
INTRODUÇÃO AOS CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS. Biblioteca Virtual. Disponível em: <http://www.ejm.com.br/download/introducao%20clp.pdf>. Acesso em 25 de Março de 2025.

PRAXAIR, *Liquefação dos Gases do ar*. White Martins. 2013. Disponível em <www.whitemartins.com.br>. Acesso em 25 de Março de 2025.

MARTINS, PETRONIO; LAUGENI , FERNADO. *Administração da produção 2º Edição*. São Paulo: Editora Saraiva, 2005. p. 461-463.